

DOI: 10.31319/2519-2884.42.2023.15
УДК 658.26:621.316.1

Хмельницький Є.Д., к.т.н., доцент, ORCID:0000-0002-8605-4960,
e-mail: khmell2020@gmail.com

Клюєв О.В., к.т.н., доцент, ORCID:0000-0003-4542-3317, e-mail: kluev2006@ukr.net
Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Khmelnyskyi Evgen, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics

Klyuyev Oleg, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

ВИЗНАЧЕННЯ АНОРМАЛЬНИХ ГАРМОНІК І ГАРМОНІЙНОГО СКЛАДУ КОЕФІЦІЄНТІВ НЕСИНУСОЇДАЛЬНОСТІ У МЕРЕЖІ 10 кВ ІЗ ВЕНТИЛЬНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Дане дослідження присвячене аналізу роботи вузла електроживлення з потужним вентиляльним електроприводом постійного струму, що живиться від керованих шестифазних перетворювачів. Вимірювання показали незначний рівень канонічних гармонік (до 1,5 %), у той час як гармоніки $\nu = 21-39$ перевищували 2,5—3,5 %. Таку ситуацію можна пояснити наявністю аномальних гармонік високого порядку, коли асиметрія імпульсів відкриття тиристорів перетворювачів перевищує 3 ел. град. Аналіз коефіцієнтів несинусоїдальності як випадкового процесу та його розкладання у ряд Фур'є дозволило визначити гармонійний склад коефіцієнтів несинусоїдальності струму і напруги.

Ключові слова: вентиляльний електропривод; канонічні гармоніки; аномальні гармоніки; гармонійний склад коефіцієнтів несинусоїдальності.

This study is devoted to the analysis of the operation of the power supply unit with a powerful DC valve electric drive powered by controlled six-phase converters. Measurements showed an insignificant level of canonical harmonics (up to 1.5 %), while harmonics $\nu = 21-39$ outweighed 2,5—3,5 %. Such a situation can be explained by the presence of abnormal harmonics of a high order, if the asymmetry of the impulses of the thyristor turns over 3 el. deg. The analysis of the coefficients of non-sinusoidal distance as a random process of that yogic distribution in the Fur'e series made it possible to determine the harmonic warehouse of the coefficients of non-sinusoidal distance of the current and the voltage. This study is dedicated to the analysis of the work of the electrical power unit with a pressure valve electric drive of a constant stream, which is to live in the form of six-phase transformations. The balance showed an insignificant level of canonical harmonics (up to 1.5 %), at that time the harmonics

Keywords: valve electric drive; canonical harmonics; abnormal harmonics; harmonic composition of non-sinusoidal coefficients.

Постановка проблеми

У статті розглядається робота вузла електроживлення з потужним вентиляльним електроприводом, що живиться від керованих шестифазних перетворювачів. Експериментальне вимірювання вищих гармонік (ВГ) показало наступне: канонічні гармоніки $\nu \leq 13$ не перевищують 1—1,5 %, у той час як коефіцієнт несинусоїдальності напруги перевищує нормативний у 5 % (дорівнює 5,5—8,2 %). Така ситуація можлива у разі наявності аномальних гармонік високого порядку, що можна пояснити асиметрією імпульсів відкриття тиристорів $\varepsilon \geq 3$ ел. град.

Таким чином, задача дослідження визначається у розрахунку гармонійного складу коефіцієнтів несинусоїдальності та аналізу аномальних гармонік.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Наукових робіт, присвячених дослідженню вищих гармонік у мережах промислових підприємств, останнім часом не так вже й багато. Такі роботи присвячені аналізу негативного

впливу ВГ на роботу електричного обладнання та систем вимірювання і керування [4]. У той же час виникає проблема у проектуванні фільтро-компенсуючих пристроїв для діючих підприємств [2]. Вирішення цієї проблеми неможливо без попередніх вимірювань ВГ та гармонійного аналізу коефіцієнтів несинусоїдальності.

Формулювання мети дослідження

Мета дослідження — визначення причин появи аномальних гармонік та їх взаємний вплив на формування гармонійного складу коефіцієнтів несинусоїдальності струму і напруги. Процес функціонування вентильного електроприводу супроводжується генерацією вищих гармонік — канонічних і неканонічних. Обмеження рівня канонічних гармонік здійснюється силовими резонансними фільтрами, однак у разі асиметрії імпульсів керування тиристорами перетворювачів генеруються неканонічні — як парні, так і непарні гармоніки. Склад неканонічних гармонік можливо визначити у разі гармонійного аналізу коефіцієнтів несинусоїдальності струму і напруги. Проведений гармонійний аналіз дає можливість визначити склад фільтро-компенсуючого пристрою у разі його проектування.

Виклад основного матеріалу

На основі статистичної інформації з вищих гармонік (ВГ) до 40-го порядку, при відсутності та наявності силових резонансних фільтрів (СРФ), отримані значення коефіцієнтів несинусоїдальності струму і напруги, що дозволило визначити гармонійний склад коефіцієнтів та обґрунтувати низку факторів, які впливають на структуру даного випадкового процесу. Дослідження дозволили також сформулювати вимоги до складу резонансних фільтрів у процесі проектування фільтро-компенсуючого пристрою.

1. Характеристика вузла електропостачання.

Дослідження [1] проводились на підстанції глибокого вводу (ПГВ) з трансформаторами типу ТРДН – 150/10 кВ номінальною потужністю 31,5 МВА. Підстанція КРЗ–5 живить три цехові підстанції: ПС–3, ПС–4 та ПС–5. Нормальна схема живлення: підстанцій ПС–3 та ПС–4 працюють від трансформатора Т–3, а підстанція ПС–5 – від трансформатора Т–4. Потужність навантаження III секції шин трансформатора Т–4: електродвигуни 275–800 кВт (загалом 13035 кВт) мають живлення від керуємих шестифазних тиристорних перетворювачів за схемою з'єднання анодних трансформаторів «зірка – зірка»; на IV секції шин увімкнені електродвигуни 240–650 кВт (загалом 11225 кВт), вони живляться від керуємих шестифазних перетворювачів з мостовою схемою з'єднання анодних трансформаторів.

2. Результати експериментальних досліджень.

Вимірювання показників струму і напруги проведено на вторинній стороні трансформатора Т–4 у разі живлення цехової підстанції ПС–5. Вимірювання проводилося мікропроцесорним комплексом ANAYST–2Q до 40-ї гармоніки включно при різних навантаженнях електродвигунів та при різних комбінаціях вмикання силових фільтрів. Нижче наведені вибірки із загального масиву експериментальних даних: гармоніки струму (табл. 1), гармоніки напруги (табл. 2).

Таблиця 1. Вторинний струм трансформатора Т–4 і коефіцієнти несинусоїдальності струму

Час вимірювань	Діюче значення струму трансформатора			ТНДІ (%)		
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3
16 : 20 : 38	2,025	1,980	1,045	3,7	3,1	2,8
16 : 21 : 38	1,491	1,506	1,512	4,8	4,4	4,1
16 : 22 : 38	1,155	1,370	1,430	4,9	4,5	4,1
.
.
.
17 : 10 : 38	0,908	0,890	0,880	4,2	4,0	3,9
17 : 11 : 38	0,825	0,821	0,801	4,1	3,9	3,8

Таблиця 2. Вторинна напруга трансформатора Т-4 і коефіцієнти несинусоїдальності напруги

Час вимірювань	Діюче значення напруги трансформатора			ТНДУ (%)		
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3
16 : 20 : 38	58,300	59,162	58,650	6,3	6,2	9,4
16 : 21 : 38	58,262	59,162	58,650	5,0	4,8	6,6
16 : 22 : 38	58,937	59,450	58,925	4,8	5,0	6,4
.
.
.
17 : 10 : 38	58,975	60,100	59,400	2,6	2,4	2,6
17 : 11 : 38	58,862	59,987	59,287	2,2	1,6	2,2

Слід вказати, що вимірювання показників проводилось синхронно, до подальших розрахунків узяті тільки коефіцієнти несинусоїдальності струму $\alpha_i^{\%}$ та напруги $\alpha_U^{\%}$, відповідно фази 1 та фази 3.

Як викладено вище, рівень і склад гармонік визначався режимом навантаження вентиляних перетворювачів. Так, при номінальному навантаженні та відсутності силових фільтрів були зафіксовані наступні результати: друга і третя гармоніки мали середнє значення 0,6—0,8 %; канонічні гармоніки 5—7 були на рівні 1,3—1,6 %, а гармоніки 11—13 на рівні 1,2—1,4 %. Коефіцієнт несинусоїдальності напруги знаходився у межах 5,5—8,2 %, що не відповідає таким невеликим значенням канонічних гармонік. У той же час були зафіксовані аномальні парні і непарні гармоніки значної величини. Так, непарні гармоніки: $\nu = 25$ —2,8 %; $\nu = 37$ —2,7 %; парні гармоніки: $\nu = 26$ —2,8 %; $\nu = 36$ —1,8 %; $\nu = 38$ —1,7 %.

В якості прикладу, наведена осцилограма (рис. 1) гармоніки $\nu = 30$ —2,9 %, яка зафіксована мікропроцесорним комплексом [2]. Таким чином, можна вважати, що високий рівень коефіцієнтів несинусоїдальності визначився непарними і парними неканонічними гармоніками високого порядку.

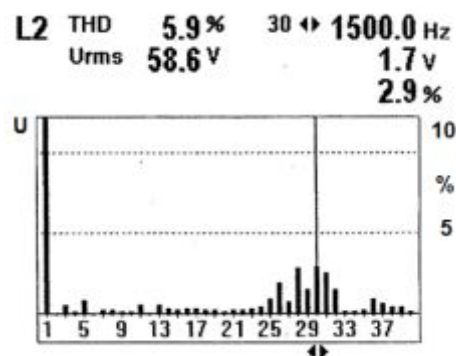


Рис. 1. Спектр частот і рівнів гармонік напруг цехової підстанції ПС-5

Попередніми дослідженнями [1] було показано, що такі надвисокі рівні аномальних гармонік обумовлені незадовільною роботою системи імпульсно-фазового керування (ІФК), а саме невідповідними моментами вмикання вентилів (тиристорів).

3. Результати обробки статистичного матеріалу.

З метою перевірки якості статистичної інформації були статистичні показники та коефіцієнти парної кореляції між коефіцієнтами $\alpha_i^{\%}$ та $\alpha_U^{\%}$ різних фаз. Результати розрахунків наведені у табл. 3.

Таблиця 3. Статистичні показники результатів вимірювання

Тип гармоніки	фаза	Математичне очікування, $m_x^{\%}$	Середньоквадратичне відхилення, $\sigma_x^{\%}$
Гармоніки струму, $\alpha_i^{\%}$	1	4,3360	0,5882
	3	3,6980	0,6307
Гармоніки напруги, $\alpha_U^{\%}$	1	4,4320	1,4985
	3	5,5680	2,4255

Коефіцієнт кореляції струмів фаз: $cor(I_1 I_3) = 0,934$.

Коефіцієнт кореляції напруги фаз: $cor(U_1 U_3) = 0,987$.

Таким чином, експериментальна інформація статистично достовірна.

За даними [4] для схеми перетворювача «зірка — зірка» асиметрія імпульсів керування більше 1 ел. град. неприпустима, так як зростає струм намагнічування зрівнювального реактора, що призводить до значного зростання рівня аномальних парних і непарних гармонік.

У разі роботи перетворювача за мостовою схемою магнітопровід анодного трансформатора також підмагнічується сталим магнітним потоком, що призводить до зростання канонічних 3, 5, 7 гармонік, а особливо парних неканонічних гармонік, однак у цьому разі асиметрія імпульсів керування припустима до 3 ел. град.

Наші дослідження [2] показали, що асиметрія імпульсів керування перетворювачами даного об'єкту значно більша, тобто до 8—10 ел. град., що обумовлює появу непарних і парних неканонічних гармонік надвисоких значень.

Проведені дослідження довели, що рівень гармонік напруги суттєво залежить від низки чинників. По-перше, від схеми вентильного перетворювача, характеристик анодного трансформатора, а також технологічних чинників, які обумовлюють сам процес прокатки, тобто сортаменту металу, його температури, швидкості прокатки та ін.

4. Визначення гармонійного складу коефіцієнтів несинусоїдальності (КНС).

Гармонійний склад КНС (або структура коефіцієнтів несинусоїдальності) — це додаток гармонік різних частот з різними фазами, який формує величини коефіцієнтів несинусоїдальності, що принципово важливо у виборі складу фільтро-компенсуючого пристрою (ФКП), який вмикається на шини 10 кВ підстанції ПГВ.

Вище було доведено, що коефіцієнти несинусоїдальності є випадковими величинами, обумовлені детермінованими і недетермінованими чинниками. Тому визначення структури цього стохастичного процесу здійснимо методом його розкладу у ряд Фур'є. Розрахункова методика наведена у роботі [3], вона базується на визначенні значимих і незначимих коефіцієнтів розкладу (гармонік) за критерієм Стюдента.

За результатами розкладу у ряд Фур'є визначено гармонійний склад коефіцієнтів несинусоїдальності:

– статистично значимі коефіцієнти несинусоїдальності струму:

$$\text{фаза 1: } K_i^{\%} = \frac{8,6818}{2} - 0,3168 \cdot \sin \omega_1 \cdot t + 0,3402 \cdot \cos \omega_2 \cdot t + 0,2884 \cdot \sin \omega_2 \cdot t + 0,2487 \cdot \cos \omega_8 \cdot t;$$

$$\text{фаза 3: } K_i^{\%} = \frac{7,4823}{2} - 0,4305 \cdot \sin \omega_1 \cdot t + 0,3684 \cdot \cos \omega_2 \cdot t + 0,3386 \cdot \sin \omega_2 \cdot t - 0,3237 \cdot \sin \omega_8 \cdot t.$$

– статистично значимі коефіцієнти несинусоїдальності напруги:

$$\text{фаза 1: } K_U^{\%} = \frac{8,9462}{2} + 0,8133 \cdot \sin \omega_1 \cdot t - 0,7104 \cdot \sin \omega_2 \cdot t + 0,8776 \cdot \sin \omega_5 \cdot t;$$

$$\text{фаза 3: } K_U^{\%} = \frac{11,2518}{2} + 1,3176 \cdot \sin \omega_1 \cdot t - 1,1093 \cdot \sin \omega_2 \cdot t + 1,3228 \cdot \sin \omega_5 \cdot t.$$

Таким чином, основними гармоніками, які визначені у складі коефіцієнтів несинусоїдальності є парні аномальні друга та восьма гармоніки, що безумовно свідчить про негативний вплив асиметрії імпульсів вмикання тиристорів перетворювачів.

Висновки

Експериментальні вимірювання показали: рівень канонічних гармонік 5, 7, 11, 13 знаходиться на рівні 1—1,5 %, однак коефіцієнт несинусоїдальності перевищує норму у 5 %, що свідчить про значну величину аномальних гармонік. Гармонійний склад коефіцієнтів несинусоїдальності струмів та напруги формується за рахунок 2-ї та 8-ї гармонік.

Визначення гармонійного складу коефіцієнтів несинусоїдальності дозволяє обґрунтувати склад резонансних фільтрів у разі проектування фільтрокомпенсуючого пристрою вузла електроживлення.

Список використаної літератури

1. Хмельницький Є. Д., Ключев О. В. Визначення ефективності фільтрів вищих гармонік у мережі 10 кВ металургійного комбінату. *Збірник наукових праць ДДТУ (технічні науки)*. Кам'янське, 2017. С. 104–111.
2. Садовой О. В., Хмельницький Є. Д., Ключев О. В. Вищі гармоніки у розподільній мережі 10 кВ металургійного комбінату і питання оптимізації роботи силових резонансних фільтрів. *Наукові праці КрНУ*. Кременчук. 2009. С. 45–53.
3. Хмельницький Є. Д., Ключев А. В. Исследование нестационарных случайных процессов в электроснабжении. *Наукові праці КрНУ*. Кременчук. 2005. №3 (32). С. 144–151.
4. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий : 6-е изд., перераб. и доп. Москва: Энергоатомиздат, 2010. 375 с.

DETERMINATION OF ABNORMAL HARMONICS AND HARMONIC COMPOSITION COEFFICIENTS OF NON-SINUSOIDALITY IN A 10 kV NETWORK WITH A VALVE ELECTRIC DRIVE OF DIRECT CURRENT

Abstract

The operation process of the electric valve drive is accompanied by the generation of higher harmonics — canonical and non-canonical. Limitation of the level of canonical harmonics is carried out by power resonance filters, however, in the case of asymmetry of the control pulses of the thyristors of the converters, non-canonical harmonics are generated — both even and odd harmonics. The composition of non-canonical harmonics can be determined in the case of harmonic analysis of non-sinusoidal current and voltage coefficients. The conducted harmonic analysis makes it possible to determine the composition of the filter-compensating device in the case of its design.

The article examines the operation of a power supply unit with a powerful valve electric drive powered by controlled six-phase converters. Experimental measurement of higher harmonics showed the following: canonical harmonics $\nu \leq 13$ do not exceed 1—1.5 %, while the non-sinusoidal voltage coefficient exceeds the standard by 5 % (equal to 5.5—8.2 %). Such a situation is possible in the presence of high-order abnormal harmonics, which can be explained by the asymmetry of thyristor opening pulses $\varepsilon \geq 3$ el. deg.

This study is devoted to the analysis of the operation of the power supply unit with a powerful DC valve electric drive powered by controlled six-phase converters. Measurements showed an insignificant level of canonical harmonics (up to 1.5 %), while harmonics $\nu = 21—39$ exceeded 2.5—3.5 %. Such a situation can be explained by the presence of abnormal harmonics of a high order, when the asymmetry of the opening pulses of the thyristors of the converters exceeds 3 el. deg. The analysis of the non-sinusoidal coefficients as a random process and its decomposition into a Fourier series made it possible to determine the harmonic composition of the current and voltage non-sinusoidal coefficients.

Thus, the task of the research is defined in the calculation of the harmonic composition of non-sinusoidal coefficients and the analysis of abnormal harmonics.

References

- [1] Hmelnickij Ye. D. & Klyuyev O. V. (2017) *Viznachennya efektyvnosti filtriv vishih garmonik u merezhi 10 kV metalurgijnogo kombinatu [Determination of the efficiency of filters of higher harmonics in the 10 kV network of the metallurgical plant]*. Zbirnik naukovih prac DDTU (tehnicni nauki) Kam'yanske, 2017. S. 104–111. [in Ukrainian].
- [2] Sadovoj O. V. & Hmelnickij Ye. D. & Klyuyev O. V. (2009) *Vishi garmoniki u rozpodilnij merezhi 10 kV metalurgijnogo kombinatu i pitannya optimizaciyi roboti silovih rezonansnih filtriv [Higher harmonics in the 10 kV distribution network of the metallurgical plant and the issue of optimizing the operation of power resonance filters]*. Naukovi pracі KrNU. Kremenčuk. 2009. S. 45-53. [in Ukrainian].
- [3] Hmelnickij E. D. & Klyuev A. V. (2005) *Issledovanie nestacionarnyh sluchajnyh processov v elektrosnabzhenii [Research of non-stationary random processes in power supply]*. Naukovi pracі KrNU. Kremenčuk. 2005. №3 (32). S. 144–151. [in Russian].
- [4] Zhezhelenko I. V. (2010) *Vysshie garmoniki v sistemah elektrosnabzheniya prompredpriyatij [Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises]: 6–e izd., pererab. i dop.* Moskva: Energoatomizdat, 2010. 375 s. [in Russian].

Надійшла до редколегії 07.04.2023